

На правах рукописи

ЕГОРОВ АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ПОЛИКОРРЕЛЯЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ и УСТРОЙСТВА  
РАЗРЕШЕНИЯ СИГНАЛОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ  
МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.12.13 - СИСТЕМЫ, СЕТИ и УСТРОЙСТВА  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации **на** соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2003

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and a long, sweeping horizontal stroke extending to the right.

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки и техники  
**Татарстана**, академик АН Республики Татарстан,  
доктор технических наук, профессор Чабдаров  
Шамиль Мидхатович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор  
**Ибатуллин Эмир Аминович**,  
кандидат технических наук  
Головин Евгений Михайлович

Ведущая организация:

Институт проблем информатики Академии наук  
республики **Татарстан**, г. Казань

Защита состоится “ 13 ” октября 2003 г. в 15 часов на заседании диссертационного  
Совета Д 212.079.03 при Казанском государственном техническом университете  
им. А.Н.Туполева по адресу: **420111**, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10

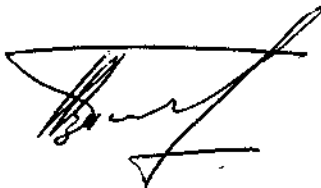
Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим выслать  
по адресу: **420111**, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10, КГТУ им. А.Н.Туполева, ученому секретарю  
диссертационного совета.

>

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного  
технического университета им. А.Н.Туполева.

Автореферат разослан “ 11 ” сентября 2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. техн. наук, профессор



Шербаков Г.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** темы. Актуальным направлением совершенствования перспективных систем мобильных телекоммуникаций (СМТ) является исследование и разработка алгоритмического обеспечения, реализующего помехоустойчивую обработку сигналов СМТ, на основе адекватных математических моделей.

Адекватное представление сигналов и помех в системах мобильных телекоммуникаций определяется объективной сложностью существующих каналов радиосвязи, что приводит к стохастическим математическим моделям. Это обусловлено, во-первых, случайным характером поступающих в линию сообщений (многостанционный доступ в единый радиоканал), во-вторых, действием различных дестабилизирующих факторов и комплекса помех (**многолучевый** характер распространения **радиоволн**, разнообразие и неустойчивость вероятностных распределений), недостаточно полно описываемых традиционными гауссовскими моделями, которые до последнего времени преобладала в задачах статистической теории связи. Это объясняется значительным упрощением синтеза оптимальных алгоритмов приема на основе таких моделей. При этом при определенных ограничениях гауссовские модели действительно является вполне удовлетворительным приближением.

Современные СМТ характеризуются новыми объективными факторами, которые ранее не имели такого значения, как в современном высокотехнологичном информационном обществе, среди которых: значительная интенсификация информационного обмена в ограниченных частотно-территориальных пределах, непрерывный рост числа объектов информационного **обмена**, а, следовательно, и усложнение условий работы оконечных устройств приема-передачи информации, ярко выраженный случайный характер мешающих воздействий. Свободный доступ в радиоканал многочисленных **приемо-передатчиков** СМТ (случайного числа абонентов) вызывает поток **внутри-**и внесистемных **помех**, создающих на входах приемников аппаратуры различные комбинационные ситуации. По результатам обработки входного сигнала приемное устройство базовой станции должно определить количественный и качественный состав текущей комбинации абонентских сигналов мобильных станций и произвести выделение полезной информации (многопользовательское детектирование), а приемное устройство мобильной станции с заданной вероятностью должно выделять из смеси сигналов информацию, адресованную данному конкретному абоненту, причем приемники должны работать с минимальной ошибкой. Феноменологически

сложная сигнальная обстановка осложняется наличием всевозможных мешающих **воздействий**, среди которых: многолучевость сигналов в результате переотражений, медленные и быстрые замирания уровня сигнала, наличие различного рода импульсных, сосредоточенных и шумовых помех и т.п. В совокупности указанные факторы приводят к тому, что существующие алгоритмы обработки сигналов в рамках традиционного корреляционного подхода становятся неадекватными реальным распределениям **сигнально-помеховой** обстановки (СПО) в радиоканале, а задача обработки сигналов в современных СМТ перестает быть задачей только обнаружения (различения) сигналов с **гауссовскими** законами распределения на фоне также **гауссовских помех**, что предполагалось при ее решении традиционными корреляционными методами, а перерастает в сложную комплексную проблему полного разрешения случайного числа сигналов абонентов СМТ на фоне помех со структурой **сигнала, ХИП**, и шума в **негауссовской** постановке.

Стохастический характер входных сигналов и помех с ярко выраженной **негауссовостью** законов их распределения обуславливает необходимость разработки новых **вероятностных** моделей представления негауссовских сигналов, соответствующих методов анализа и синтеза алгоритмов их обработки.

Для описания негауссовских случайных процессов с произвольными законами распределения в настоящее время используются модели на основе ряда известных распределений. Благодаря накопленному в рамках корреляционной теории опыту по использованию моделей на основе **гауссовского** распределения, наиболее удобным для решения задач оптимальной обработки случайных процессов с произвольными законами распределения оказывается целенаправленное использование моделей в виде смесей гауссовских распределений - полигауссовых моделей (ПГ); которые получили всестороннее развитие в работах Ш.М.Чабдарова и его учеников.

В работах научной школы Ш.М.Чабдарова задачи оптимального обнаружения, различения, разрешения случайных процессов с произвольными законами распределений решаются на основе использования универсальных полигауссовых и **марково-смешанных** полигауссовых (МС-ПГ) моделей и методов. Так **Файзуллин Р.Р.** синтезированы адаптивные алгоритмы разрешения дискретных сигналов на фоне комплекса негауссовских помех и шумов для детерминированной, стохастической и **квазидетерминированной** моделей сигнала. **Надеевым А.Ф.** на основе **квазидетерминированных** моделей сигналов и помех решена задача синтеза алгоритма обнаружения-различения радиоимпульсных многоэлементных сигналов на фоне комплекса шумовых и импульсных помех на основе МС-ПГ модели. Получены алгоритмы приема многоэлементных сигналов **в целом с произвольным** принятием решений.

Синтез и реализация алгоритмов обработки сигналов при объективной сложности комплекса СПО и характерных особенностей современных СМТ является сложной задачей системного плана. Ее решение невозможно при отсутствии системного подхода к разработке радиоэлектронных систем различного назначения.

В ряде работ, выполненных под руководством проф. **Ш.М.Чабдарова**, получил развитие комплексный подход, выражающийся в совместном исследовании, **синтезе**, анализе и оптимизации алгоритмов обработки сигналов и реализующих их параллельных вычислительных структур.

В настоящей работе развит комплексный системный подход к задаче формализованного синтеза параллельных алгоритмов оптимальной обработки дискретных сигналов и структур, реализующих их устройств.

Диссертация выполнялась в соответствии с 1) планом научных работ кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем Казанского государственного технического университета имени А.Н.Туполева, 2) Государственной программой развития науки в республике Татарстан по приоритетным научным направлениям на 1996-2000 гг., 3) планом фундаментальных научно-исследовательских работ Академии наук республики Татарстан (Гранты Академии наук республики Татарстан №16-06/99(Ф), 16-06/2000(Ф), 06-6.8-87/2001(Ф), 06-6.8-164/2002(Ф)), 4) Государственной программой министерства образования РО "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники на 2003-2004 гг".

Целью **диссертационной** работы является разработка помехоустойчивых алгоритмов и устройств разрешения многоэлементных сигналов перспективных систем мобильных телекоммуникаций на фоне комплекса помех.

Поставленная цель достигается решением следующих частных задач:

- 1) Анализ характерных особенностей функционирования современных СМТ и существующих подходов к решению задачи многопользовательского детектирования, выбор и обоснование математических моделей для разработки алгоритмов разрешения многоэлементных сигналов СМТ;
- 2) Развитие комплексного подхода для решения задачи разрешения многоэлементных сигналов СМТ на фоне комплекса помех;
- 3) Решение задачи синтеза оптимального алгоритма полного разрешения флуктуирующих многоэлементных сигналов в комплексе хаотических негауссовых помех в общем виде;
- 4) Решение задачи синтеза алгоритма полного разрешения флуктуирующих многоэлементных сигналов в комплексе хаотических негауссовых помех

при априорной неопределенности относительно изменчивых параметров распределения **ХИП**;

5) Конкретизация обобщенного алгоритма полного разрешения на основе **квазидетерминированной** модели многоэлементного радиоимпульсного **сигнала**;

6) Имитационное моделирование и оценка помехоустойчивости синтезированных алгоритмов разрешения МЭС.

**Методы** исследований. Основные научно-практические результаты получены путем систематизации, анализа и теоретического обобщения достижений в области разработки перспективных СМТ, методов статистического, структурного и имитационного моделирования, технологии системного моделирования.

Теоретические исследования базируются на использовании аналитических методов теории вероятности и математической статистики, теории статистических решений, теории марковских случайных процессов, теории полигауссовых случайных явлений.

Экспериментальные исследования проведены с использованием специально разработанного программного обеспечения для задач имитационного моделирования на ЭВМ, реализованного с помощью следующих программных средств: Borland Delphi Enterprise 5.0 (Build 5.62), RX Library 2.75, MatLab Version 6.1.0.450 Release 12.1, Maple 6.01.

**Научная новизна** и **основные результаты**. Проведены исследования и получено новое развитие концепции синтеза алгоритмов и программных средств на основе комплексного подхода к решению задачи разрешения многоэлементных сигналов на фоне комплекса помех как в обобщенной постановке, так и для квазидетерминированной модели сигналов и помех, позволяющей получать технически реализуемые для СМТ параллельные алгоритмы разрешения МЭС в условиях сложной СПО при ограничениях на программно-аппаратные ресурсы и потенциально достижимое быстродействие.

1. Синтезирован оптимальный алгоритм и структура устройства полного разрешения флуктуирующих многоэлементных сигналов в комплексе хаотических негауссовых помех в общем виде на основе **марково-смешанных** полигауссовых вероятностных моделей и методом имитационного моделирования подтверждена его помехоустойчивость.

2. Синтезирован адаптивный алгоритм полного разрешения флуктуирующих многоэлементных сигналов в комплексе хаотических негауссовых помех при априорной неопределенности относительно параметров распределения хаотической импульсной помехи и методом имитационного моделирования

показана сходимость оценок весовых коэффициентов компонент распределения.

3. Проведена конкретизация обобщенного алгоритма полного разрешения на основе **квазидетерминированной** модели многоэлементного радиоимпульсного сигнала, которая характерна для теории и практики современных систем мобильных телекоммуникаций.

4. Обоснована и рассмотрена возможность реализации упрощенных алгоритмов разрешения, основанных: а) на использовании для аппроксимации полигауссовых плотностей вероятности гауссовских компонент с одинаковыми ковариационными матрицами и различными векторами средних значений; б) на ограничении числа проверяемых сложных статистических гипотез. Разработана структурная схема **устройства**, реализующего один из вариантов упрощенного алгоритма разрешения.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в следующем:

1) Получила дальнейшее развитие практически важная методика **полигауссового** синтеза алгоритмов обработки сигналов в части обобщения разработанных ранее **ЛГ** и **МС-ЛГ** моделей многоэлементных сигналов и алгоритмов их обработки в целях полного разрешения **МЭС**.

2) Разработаны алгоритмы, обеспечивающие повышение помехоустойчивости **СМТ** вследствие улучшения качества обработки структурно подобных перекрывающихся сигналов в комплексе разнородных помех.

3) Разработан программный комплекс, позволяющий проводить имитационное моделирование широкого класса полигауссовых и **марково-смешанных** полигауссовых алгоритмов обработки многоэлементных сигналов (причем обеспечена возможность добавления новых синтезируемых алгоритмов, за счет модульного принципа построения на основе динамически подключаемых библиотек), с сравнительной оценкой помехоустойчивости и повышением эффективности синтеза алгоритмов, **являющееся** удобным инструментальным средством для повышения эффективности работы разработчиков аппаратуры радиотехнических систем, систем связи и передачи информации.

4) Сформулированы практические рекомендации по построению на современной элементной базе **разработанных** оригинальных технических решений устройств приема многоэлементных сигналов современных **СМТ**. Получено свидетельство РФ на полезную модель.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

- Оптимальный алгоритм полного разрешения многоэлементных сигналов систем мобильных телекоммуникаций (СМТ) на основе **марково-смешанных** вероятностных моделей, сочетающего свойства внутреннего параллелизма, рекуррентности, однородности;
- Алгоритм разрешения многоэлементных сигналов СМТ, при априорной неопределенности относительно параметров распределения хаотической импульсной помехи;
- Оптимальные алгоритмы разрешения многоэлементных сигналов в рамках **квазидетерминированных** моделей радиоимпульсных сигналов СМТ и радиоимпульсных помех с учетом их интерференционного взаимодействия;
- Результаты разработки структур устройств, реализующих алгоритмы разрешения сигналов систем мобильных телекоммуникаций при ограничениях на число и типы обрабатываемых сигналов, размерность входного вектора отсчетов, а также аппаратно-программный ресурс;
- Результаты имитационного моделирования алгоритмов разрешения сигналов систем мобильных телекоммуникаций, оценки их помехоустойчивости при ограничениях на состав и параметры **сигнально-помеховой** обстановки.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и форумах: 7-я Международная научно-техническая конференция "Радиолокация, навигация, связь" (Воронеж, **2001**); Международная конференция по телекоммуникациям IEEE/ICC2001, (С.-Петербург, 2001); 4-я Международная конференция и выставка "Цифровая обработка сигналов и ее применение" DSPA-2002 (Москва, 2002); Международная конференция-выставка военных и двойных технологий "Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления" (Нижний Новгород, 2002); IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (Kazan, Russia, 2002); 1-й Международный радиоэлектронный форум МРФ-2002 (**Украина**, Харьков, 2002), 7-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Украина, Харьков, 2003), на семинаре научных руководителей работ, выполняемых по направлению "Топливо-энергетические и сырьевые ресурсы, энергосберегающие технологии их освоения" в рамках "Программы развития приоритетных направлений науки в республике Татарстан на 2001-2005 гг." (Казань, 2003).

Внедрение **результатов** диссертации. Теоретические и практические результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены и использованы на ряде казанских предприятий и организаций: ОАО "**Таиф-Телком**", ФГУП ФНПЦ



"Радиоэлектроника", Академия наук Республики Татарстан, в ряде плановых бюджетных и хозяйственных работ Казанского государственного технического университета имени А.Н.Туполева, а также использованы в учебном процессе по специальностям 200700, 201000, 201200 в КГТУ им. А.Н.Туполева.

**Публикации.** Основное содержание **диссертационной** работы отражено в 17 печатных работах, из них 1 свидетельство на полезную модель РФ, 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, 4 статьи, 1 учебное пособие, 10 материалов и трудов конференций.

**Личный вклад автора в разработку проблемы.** Соискателем в соответствии с целью работы, поставлены задачи, обеспечивающие ее решение, получены и обоснованы новые научные результаты, сформулированы основные положения, выводы и рекомендации защищаемой работы. Соискателем разработано оригинальное программное **обеспечение** для проведения имитационного моделирования.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 166 машинописных страницах и содержит введение, четыре главы основного текста, заключение, список использованной литературы и два приложения. Иллюстративный материал представлен в виде 30 рисунков, 2 таблицы.

**Библиография** включает 103 наименования **отечественных** и зарубежных источников, в том числе 21 работу автора.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной **работы**, сформулированы цель работы, решаемые задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту. Приведена структура диссертации, форма апробации и внедрения ее результатов.

*В главе 1* - "Постановка задачи синтеза **марково-смешанных** полигауссовых алгоритмов разрешения многоэлементных сигналов в системах подвижной радиосвязи" проведен анализ состояния и тенденций развития современных систем подвижной радиосвязи и рассмотрены объективные условия и особенности их функционирования, анализируются факторы, ухудшающие работу данного класса систем.

Отмечаются факторы, приводящие к тому, что существующие алгоритмы обработки сигналов в рамках традиционного корреляционного подхода становятся неэффективными вследствие неадекватности реальным распределениям **сигнально-помеховой** обстановки в радиоканале, а чтобы

получить сколько-нибудь удовлетворительные результаты при синтезе алгоритмов обработки сигналов, необходимо учесть в модели СПО действительные законы распределения сигналов и помех, а также механизмы их взаимодействия (интерференция, многолучевость).

Теоретические основы современных спектрально-эффективных методов многостанционного доступа (CDMA, **WCDMA**, СМТ 3-го и 4-го поколения) базируются на системах сигналов, которые строго ортогональны, т.е. взаимокорреляционные функции сигналов разных абонентов **равны** нулю, что в идеале позволяет достичь оптимальных характеристик приемо-передатчиков. Однако практическая реализация предлагаемых моделей сигналов и алгоритмов их обработки сопровождается неизбежным возникновением взаимных помех, что приводит к нарушению строгой ортогональности передаваемых сигналов, и, как следствие, традиционные алгоритмы корреляционной обработки становятся неэффективными, а их применение приводит к ухудшению таких важных системных характеристик как максимальное число одновременно обслуживаемых абонентов (емкость системы), максимальная скорость двоичного потока данных и т.п., вследствие того, что возрастает коэффициент ошибок.

Например, в системах, основанных на методах множественного доступа с частотным разделением каналов (FDMA), переходные помехи между каналами возникают вследствие неидеальности частотных характеристик разделительных фильтров, нелинейности элементов в передающем тракте. В системах ТОМА в каналах с многолучевым распространением и замираниями происходит расширение сигналов по временной оси и, соответственно, к появлению межсимвольных искажений.

В традиционных CDMA системах сигналы разных пользователей отличаются видом кодовой последовательности, причем с точки зрения отдельно взятого пользователя сигналы других пользователей воспринимаются как шум или помехи многостанционного доступа (**MAI-Multiple Access Interference**). Используемые в системах CDMA 2-го поколения методы однопользовательского детектирования основаны на вычислении корреляционного интеграла поступающей на вход приемника смеси широкополосных сигналов разных абонентов с кодовой последовательностью, являющейся уникальной **для** каждого абонента. Так как в идеальном случае функция взаимной корреляции сигналов от разных абонентов равна нулю, такой приемник должен точно выделять сигнал, адресуемый только ему. Однако на практике, вследствие нарушения строгой ортогональности сигналов (в силу разного рода причин: неидеальность элементов технической реализации, **асинхронность** передачи, **многолучевость**, разница

в мощностях принимаемых сигналов (эффект "ближний-дальний") и др.) применение этих детекторов приводит к возникновению неустранимых ошибок **приема**, даже в тех случаях, когда отношение "сигнал-шум" в канале связи достаточно высокое.

Формулируется задача разрешения комбинаций случайного числа **наложившихся** сигналов **СМТ** в комплексе **помех**, направленная на повышение помехозащищенности аппаратуры СМТ. Анализируется состояние проблемы разрешения сложных сигналов в области оптимального приема и селекции сигналов. Проведен сравнительный анализ существующих методов многопользовательского детектирования (MUD - Multiuser Detection) как упрощенного аналога задачи полного разрешения сигналов. Обосновывается возможность использования дополнительных объемов полезной информации, содержащейся в радиоканале, в качестве существенных признаков многоэлементных сигналов, и выбор адекватных моделей и методов в качестве математической основы синтеза алгоритмов разрешения многоэлементных сигналов СМТ.

В главе 2 - "Синтез алгоритмов полного разрешения многоэлементных сигналов на основе **марково-смешанных** полигауссовых вероятностных моделей и их статистическое моделирование" представлена строгая формулировка задачи полного разрешения многоэлементных сигналов. Для ее решения предлагается использовать полигауссовы и **марково-смешанные** полигауссовы вероятностные модели.

Представлен метод синтеза обобщенного оптимального МС-ПГ алгоритма разрешения флуктуирующих многоэлементных сигналов на фоне помех.

Рассмотрим задачу разрешения ансамбля **К-элементных** сигналов  $S = \{s_j(t), j = \overline{1, J}\}$  вида:

$$s_j(t) = \sum_{k=1}^K s_{i,jk}(t - t_k), i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, \quad (1)$$

где **I-число** типов элементарных сигналов, **J** - число сигналов в ансамбле, заданных МС-ПГ моделями:

$$w^{i,k}(\bar{u}_k) = \sum_{n_k^j=1}^{N_j} q_{n_k^j}^j N\left\{\bar{u}_k, \bar{m}_{n_k^j}^{i,k}, \left|\sigma_{n_k^j}^{i,k}\right|\right\}, k = \overline{1, K}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J},$$

$$q_{n_k^j}^j = \begin{cases} P(n_k^j | n_{k-1}^j), & k = \overline{2, K}, \\ P(n_k^j), & k = 1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $P(n_k^i | n_{k-1}^i)$  и  $P(n_k^i)$  - элементы матрицы переходных вероятностей  $\|P^j\|$  и вектора начальных вероятностей  $\bar{P}_1^j$ .

Сигналы могут появляться на интервале наблюдения (О, Т) в различных случайных комбинациях. Поэтому входное колебание  $\bar{u}$  может содержать сумму **случайного** числа  $r$  сигналов  $r = \overline{1, R}$ . Кроме того, во входной смеси присутствует белый **гауссовский** шум  $n_n(t)$  и ординарный поток независимых импульсных помех  $n_n(t)$  с вероятностью  $P_n$  накладываются на  $k$ -ю временную позицию многоэлементного сигнала (МЭС). При условии наложения импульсной помехи на  $k$ -ю временную позицию ее распределение имеет следующий вид:

$$w^n(u_k) = \sum_{n_k^n=1}^{N_k} q_{n_k^n}^n N\left\{\bar{u}_k, \bar{m}_{n_k^n}^n, \left|\sigma_{n_k^n}^n\right|\right\}. \quad (3)$$

Совместное распределение помех и шума на  $k$ -й позиции имеет вид:

$$w^{16}(u_k) = (1 - p_n)w^n(u_k) + p_n w^{nm}(u_k) = (1 - p_n)N\left\{\bar{u}_k, \bar{0}, \left|\sigma^n\right|\right\} + p_n \sum_{n_k^n=1}^{N_k} q_{n_k^n}^n N\left\{\bar{u}_k, \bar{m}_{n_k^n}^n, \left|\sigma_{n_k^n}^n\right|\right\} \quad (4)$$

При наложении  $r$  сигналов с номерами  $j_1, j_2, \dots, j_r$  вследствие инвариантности гауссовских распределений относительно линейных преобразований, наблюдаемый на  $k$ -й временной позиции вектор  $\bar{u}_k$  также представляется МС-ПГ моделью следующего вида:

$$w^{i_{j_1 k}, i_{j_2 k}, \dots, i_{j_r k}}(u_k) = \sum_{\substack{n_1^n=1 \\ j_1 \neq 0}}^{N_1} \sum_{\substack{n_2^n=1 \\ j_2 \neq 0}}^{N_2} \dots \sum_{\substack{n_r^n=1 \\ j_r \neq 0}}^{N_r} q_{n_1^n}^{j_1} q_{n_2^n}^{j_2} \dots q_{n_r^n}^{j_r} N\left\{\bar{u}_k, \bar{m}_{n_1^n n_2^n \dots n_r^n}^{i_{j_1 k}, i_{j_2 k}, \dots, i_{j_r k}}, \left|\sigma_{n_1^n n_2^n \dots n_r^n}^{i_{j_1 k}, i_{j_2 k}, \dots, i_{j_r k}}\right|\right\}, \quad (5)$$

где  $i_{j_1 k}, i_{j_2 k}, \dots, i_{j_r k}$  - набор типов элементарных сигналов на  $k$ -й временной позиции, соответствующих набору сигналов в конкретной комбинации наложения **сигналов** из ансамбля  $j_1, j_2, \dots, j_r$ . Для простоты рассуждений воспользуемся понятием гипотезы  $h = \overline{1, H}$ , соответствующей этой комбинации,

причем число гипотез  $H = \frac{(J + R)!}{J!R!}$ .

Гауссовские компоненты  $N\{\bullet\}$  в выражении (5) определяются свертками распределений, соответствующих **гауссовским** плотностям, взвешенными линейными комбинациями которых представлены ПГ плотности сигналов и помех в (2) и (3).

Получен обобщенный оптимальный МС-ПГ алгоритм разрешения флуктуирующих многоэлементных сигналов на фоне комплекса помех:

И

$$h = \begin{cases} h^* = \arg \max_{h=1, \Pi} \frac{P_h}{P_1} \Lambda_k^{jh}, & \text{если } \Lambda_k^{jh} \geq \frac{P_1}{P_h}, \\ 1, & \text{если } \Lambda_k^{jh} < \frac{P_1}{P_h}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\Lambda_k^{jh} = \frac{\Lambda_{k-1}^{jh}}{L^{ny}(\bar{u}_k)} \sum_{n_k^{jh}} q^{jh} \left( \bar{n}_k^{jh} \mid \bar{u}_1^{k-1} \right) L_{n_k^{jh}}^{i_{jh}^{jh} u_k}(\bar{u}_k), \quad h \in 1, \Pi \quad (7)$$

$$q^{jh} \left( \bar{n}_k^{jh} \mid \bar{u}_1^{k-1} \right) = \sum_{n_{k-1}^{jh}} P \left( \bar{n}_k^{jh} \mid n_{k-1}^{jh} \right) P \left( n_{k-1}^{jh} \mid j_r^h, \bar{u}_1^{k-1} \right), \quad (8)$$

$$P \left( \bar{n}_k^{jh} \mid j_r^h, \bar{u}_1^k \right) = \frac{q^{jh} \left( \bar{n}_k^{jh} \mid \bar{u}_1^{k-1} \right) L_{n_k^{jh}}^{i_{jh}^{jh} u_k}(\bar{u}_k)}{\sum_{n_k^{jh}} q^{jh} \left( \bar{n}_k^{jh} \mid \bar{u}_1^{k-1} \right) L_{n_k^{jh}}^{i_{jh}^{jh} u_k}(\bar{u}_k)}, \quad (9)$$

$$L_{n_k^{jh}}^{i_{jh}^{jh} u_k}(\bar{u}_k) = (1 - P_u) l_{n_k^{jh}}^{i_{jh}^{jh} u_k}(\bar{u}_k) + P_u \sum_{n_k^{u,jh}} q_{n_k^{u,jh}}^{ju} l_{n_k^{u,jh}}^{i_{jh}^{ju} u_k}(\bar{u}_k), \quad (10)$$

$$L^{ny}(\bar{u}_k) = (1 - P_u) l^{ny}(\bar{u}_k) + P_u \sum_{n_k^{u,jh}} q_{n_k^{u,jh}}^{ju} l_{n_k^{u,jh}}^{ny}(\bar{u}_k), \quad (11)$$

Начальные условия (при  $k=1$ ) имеют следующий вид:

$$\Lambda_1^{jh} = \frac{1}{L^{ny}(\bar{u}_1)} \sum_{n_1^{jh}} P \left( \bar{n}_1^{jh} \right) L_{n_1^{jh}}^{i_{jh}^{jh} u_1}(\bar{u}_1), \quad h \in 1, \Pi, \quad (12)$$

$$P \left( \bar{n}_1^{jh} \mid j_r^h, \bar{u}_1 \right) = \frac{P \left( \bar{n}_1^{jh} \right) L_{n_1^{jh}}^{i_{jh}^{jh} u_1}(\bar{u}_1)}{\sum_{n_1^{jh}} P \left( \bar{n}_1^{jh} \right) L_{n_1^{jh}}^{i_{jh}^{jh} u_1}(\bar{u}_1)} \quad (13)$$

Синтезированный алгоритм (6)~(13) при конкретизации начальных условий трансформируется в частные случаи: а) оптимальный МС-ПП алгоритм обнаружения; б) оптимальный МС-ПГ алгоритм различения.

Синтезированный алгоритм (6)~(13) сочетает достоинства марковских и полигауссовых алгоритмов: с одной стороны, структура итоговых функционалов отношения правдоподобия  $\Lambda_k^{jh}, k = 1, K$  является рекуррентной, т.е. итоговые функционалы отношения правдоподобия формируются последовательно, в течение  $K$  шагов, при этом на каждом  $k$ -м таге в структуру функционалов отношения правдоподобия в неизменном виде входят их значения, соответствующие предыдущим наблюдениям и добавляются по мере

**составляющие**, зависящие только от текущей (**k-ой**) компоненты вектора наблюдения. С другой стороны, полигауссов характер исходных моделей позволяет "набрать" значения функционалов отношения правдоподобия и апостериорных условных вероятностей компонент сигнала из совокупности частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия  $1_{k,j}^{**}(\cdot)$ .

Так же как и все полигауссовы алгоритмы, данный алгоритм имеет многоканальную структуру (**рис.1**), где каждый из каналов соответствует одному из частных функционалов отношения правдоподобия  $1_{k,j}^{**}(\cdot)$ . При этом частные

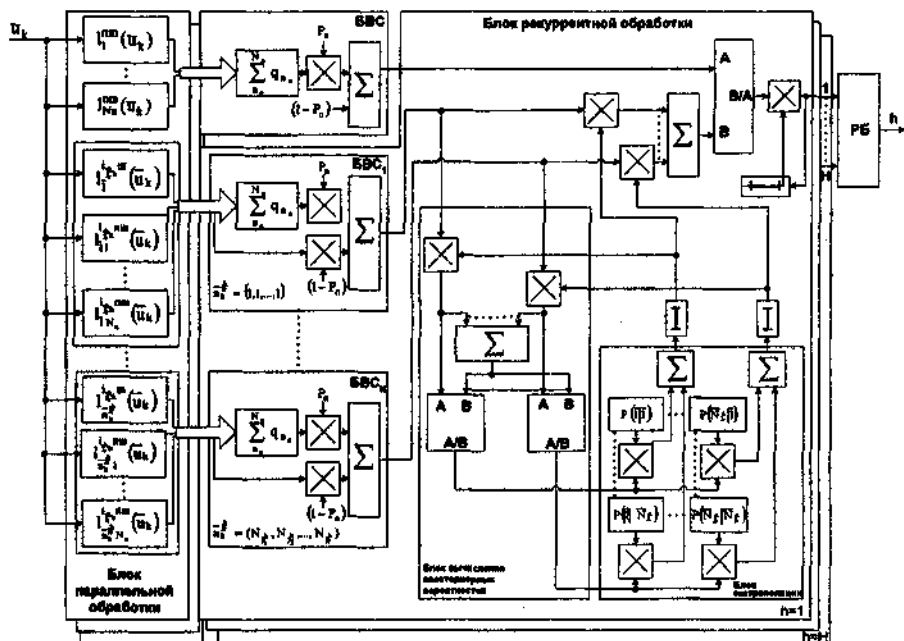


Рис. 1 Структурная схема алгоритма разрешения МС-ПГ многоэлементных сигналов

функционалы отношения правдоподобия на каждом **k-ом** шаге формируются не для всего вектора наблюдения  $\bar{u}$ , а только для отсчетов  $\bar{u}_k$ , соответствующих k-й временной позиции. По данным частным функционалам отношения правдоподобия **рекуррентно** формируются итоговые отношения правдоподобия  $\Lambda_k^j$ .

Также как и в МС-ПГ алгоритмах обнаружения-различия, синтезированных ранее **Надеевым А.Ф.**, веса  $q^{j^k}(\cdot)$  гауссовских компонент смеси сигналов не вводятся в виде постоянных коэффициентов, а также **рекуррентно** вычисляются по частным функционалам отношения правдоподобия.

При этом на каждом  $k$ -том шаге на основе всех предшествующих наблюдений  $u_1^{k-1}$  рекуррентно вычисляются апостериорные вероятности номеров компонент сигнала  $P(\bar{n}_{k-1}^j | \bar{j}_r^k, \bar{u}_1^k)$  (9) и затем, с учетом переходных матриц  $P(\bar{n}_k^j | \bar{n}_{k-1}^j)$ , они экстраполируются (8) на  $k$ -тый шаг в виде весов гауссовских компонент  $q^{j^k}(\bar{n}_k^j | \bar{u}_1^{k-1})$ .

Рассмотрены вопросы адаптации в условиях априорной неопределенности. Предложен алгоритм оценки параметров полигауссового распределения хаотической импульсной помехи (ХИП) - весов гауссовских компонент в условиях априорной неопределенности (рис.2).

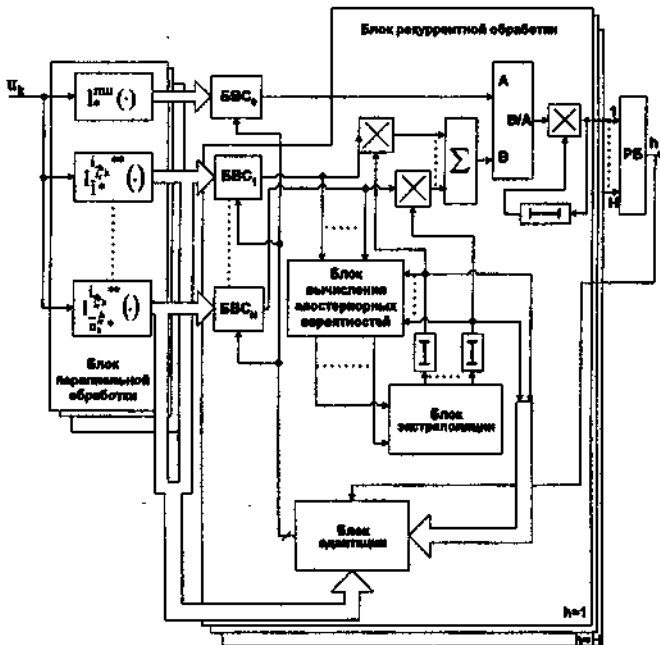


Рис.2 Структурная схема МС-ПГ адаптивного алгоритма разрешения флуктуирующих МЭС при априорной неопределенности относительно параметров распределения ХИП

В предложенном алгоритме оценка весов гауссовских компонент распределения ХИН осуществляется в блоке адаптации (рис. 3) по совокупности частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия, формируемых для основного ствола алгоритма разрешения многоэлементных сигналов.

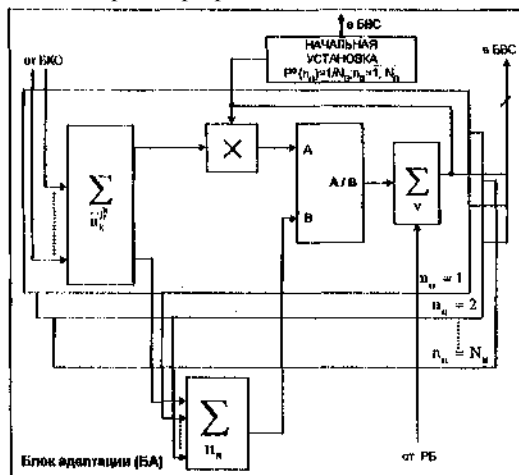


Рис. 3 Структурная схема блока адаптации МС-ПП адаптивного алгоритма разрешения МЭС

Для нахождения вероятностных характеристик синтезированных алгоритмов и анализа динамики процесса адаптации использован метод имитационного моделирования. Разработаны соответствующие компьютерные модели и оригинальное программное обеспечение. На рис.4 представлены результаты моделирования МС-ПП алгоритма разрешения. Для сравнительного анализа параллельно моделировался традиционный алгоритм корреляционной обработки (моногауссов - МГ).

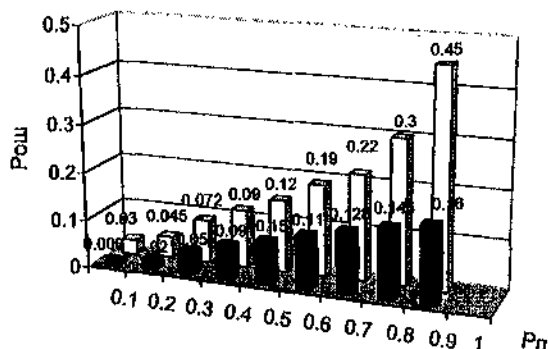


Рис. 4 Результаты имитационного моделирования МС-ПП алгоритма разрешения МЭС (вероятность полной ошибки в зависимости от Р<sub>п</sub>): ■ - ПГ; □ - МГ.



В главе 3 - “Синтез алгоритмов полного разрешения многоэлементных сигналов на основе **МС-ПГ** вероятностных моделей в рамках **квазидетерминированной** модели сигналов и помех” обобщенные алгоритмы разрешения многоэлементных сигналов, полученные в главе 2, конкретизируются на основе учета некоторых характерных особенностей **сигнально-помеховой** обстановки радиоканалов современных СМТ. При **этом** используются **квазидетерминированные** модели многоэлементных сигналов и импульсных помех, в которых случайными параметрами являются амплитудные множители  $a_{i,jk}$ ,  $b_n$  и начальные фазы  $\phi_{i,jk}$ ,  $\phi_n$ .

Произвольные распределения амплитуд радиоимпульсных многоэлементных сигналов представлены в виде **марково-смешанной** полирэлеевой (МС-ПР) вероятностной модели:

$$w^{i,jk}(a_{i,jk}) = \sum_{n_k^i=1}^{N_i} q_{n_k^i} \frac{a_{i,jk}}{(\sigma_{n_k^i}^{i,jk})^2} \exp \left\{ -\frac{(a_{i,jk})^2}{2(\sigma_{n_k^i}^{i,jk})^2} \right\}; \quad i = \overline{1, I}; \quad j = \overline{1, J}; \quad (14)$$

$$w^n(b_n) = \sum_{n_k^n=1}^{N_n} q_{n_k^n} \frac{b_n}{(\sigma_{n_k^n}^n)^2} \exp \left\{ -\frac{(b_n)^2}{2(\sigma_{n_k^n}^n)^2} \right\}, \quad (15)$$

в которой, как и в (2) номера реализующихся компонент  $n_k^i$  представляют собой дискретную цепь Маркова с вектором начальных вероятностей  $\bar{P}_1^i$  и матрицей переходных вероятностей  $|\mathbf{P}^j|$ . Синтезированный оптимальный алгоритм разрешения для **квазидетерминированной** модели сигналов и ХИП имеет вид, аналогичный (6)-(13), однако отличаются содержанием частных функционалов отношения правдоподобия, которые имеют вид:

$$\begin{aligned} l_{\bar{n}_k^{i,jk} n_k^n}^{i,jk, \text{см}}(\bar{u}_k) = & \prod_{r=1}^I \frac{N_0}{\bar{u}_{i,jk} \bar{r}_{n_k^n}^{i,jk} \left( \sigma_{n_k^n}^{i,jk} \right)^2 + N_0} \exp \left\{ \frac{\left( \sigma_{n_k^n}^{i,jk} \right)^2 \left( \bar{u}_k \bar{r}_{n_k^n}^{i,jk} \right)^2 + \left( \bar{u}_k \bar{r}_{n_k^n}^{i,jk} \right)^2}{N_0 \left( \sigma_{n_k^n}^{i,jk} \right)^2 + N_0} \right\} \times \\ & \times \frac{N_0}{\bar{u}_{nk} \bar{r}_{n_k^n}^{i,jk} \left( \sigma_{n_k^n}^n \right)^2 + N_0} \exp \left\{ \frac{\left( \sigma_{n_k^n}^n \right)^2 \left( \bar{u}_k \bar{r}_{n_k^n}^{i,jk} \right)^2 + \left( \bar{u}_k \bar{r}_{n_k^n}^{i,jk} \right)^2}{N_0 \left( \sigma_{n_k^n}^n \right)^2 + N_0} \right\}, \quad (16) \end{aligned}$$

где  $\bar{r}_{**}^{**}$  - базисные решающие функции, определяемые следующим образом:

$$\bar{r}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} = \bar{u}_{n_k} - \sum_{r=1}^R \left( \sigma_{n_k^j}^{i j k} \right)^2 \frac{\bar{r}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} \left( \bar{u}_{n_k} \bar{r}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} \right) + \bar{r}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} \left( \bar{u}_{n_k} \bar{r}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} \right)}{\bar{u}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} \left( \sigma_{n_k^j}^{i j k} \right)^2 + N_0}, \quad (17)$$

$$\bar{r}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} = \bar{u}_{n_k \perp} - \sum_{r=1}^R \left( \sigma_{n_k^j}^{i j k} \right)^2 \frac{\bar{r}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} \left( \bar{u}_{n_k \perp} \bar{r}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} \right) + \bar{r}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} \left( \bar{u}_{n_k \perp} \bar{r}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} \right)}{\bar{u}_{n_k^j \dots n_k^j n_k^j}^{i j k \dots i j k} \left( \sigma_{n_k^j}^{i j k} \right)^2 + N_0} \quad (18)$$

Синтезированный алгоритм, так же как и обобщенный МС-ПГ алгоритм разрешения, сочетает свойства рекуррентности и **многоканальности**. Характерной особенностью полученного алгоритма является то, что все многообразие частных функционалов отношения правдоподобия формируется из сигнальных и **помеховых** дискретных корреляционных интегралов.

В главе 4 - "Вопросы **практической** реализации алгоритмов обработки многоэлементных сигналов" рассматриваются практические аспекты построения устройств обработки многоэлементных сигналов систем подвижной радиосвязи на фоне комплекса помех. На основе синтезированных в главах 2, 3 оптимальных алгоритмов приема разработаны многоканальные параллельные устройства разрешения (рис.5) многоэлементных сигналов на фоне **негауссовских** помех.

Рассмотрена возможность реализации упрощенных алгоритмов разрешения, основанных на ограничении числа проверяемых сложных статистических гипотез. Проанализирована возможность применения полигауссовых и марково-**смешанных** полигауссовых моделей и алгоритмов обработки сигналов в

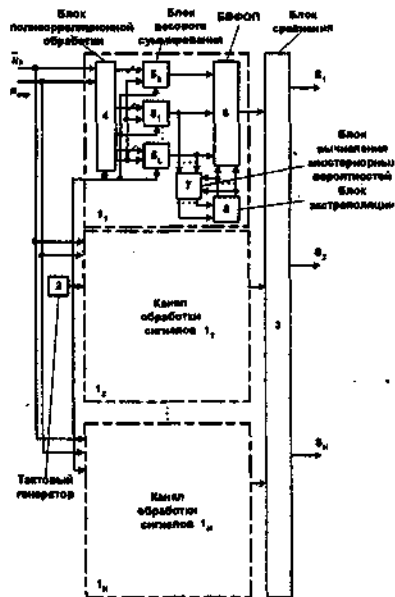


Рис. 5 Структурная схема устройства разрешения МС-ПГ многоэлементных сигналов

практически важных областях деятельности человека (геология, нефтяная промышленность, системы распознавания речи и образов).

Синтезирован **МС-ПГ** алгоритм и устройство разрешения (рис.6) многоэлементных сигналов при компонентах разложения с одинаковыми ковариационными матрицами.

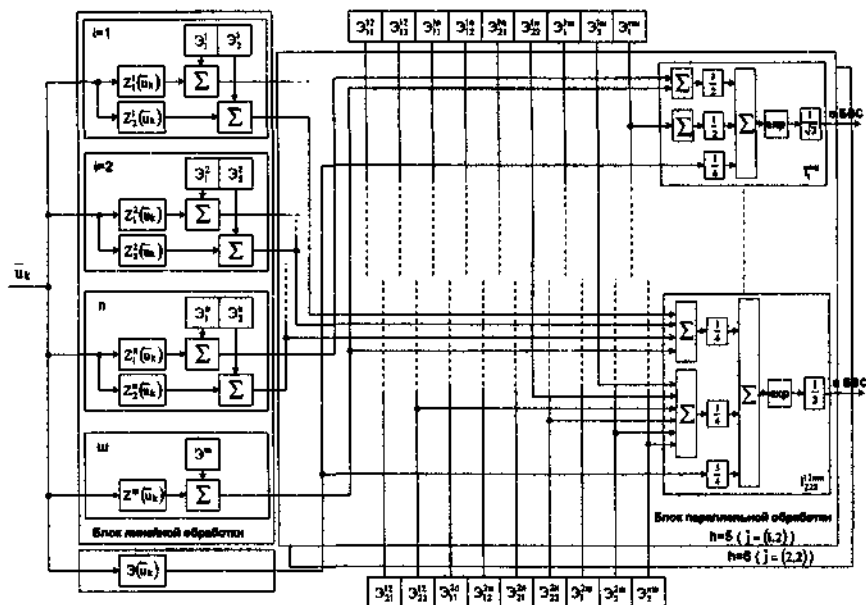


Рис.6 Устройство разрешения многоэлементных сигналов при компонентах разложения с одинаковыми ковариационными матрицами

Как видно из рис. 6 число базовых каналов обработки теперь равно числу типов элементарных сигналов **I**, **ХИП** и шума (в данном случае 4), а частные гауссовские функционалы отношения правдоподобия в рамках каналов, соответствующих гипотезам о комбинациях сигналов, вычисляются путем линейной комбинации результатов блока линейной обработки.

Проанализированы возможности использования универсальных ПГ и МС-ПГ вероятностных моделей в других областях науки и техники. В частности показано, что на основе использования моделей в виде вероятностных смесей может быть решена **задача** автоматического выделения на кривых ГИС интервалов с заданными свойствами (автоматическая классификация) и построена параллельная процедура автоматической корреляции разрезов.

*В заключении* формулируются выводы и приводится перечень основных результатов, полученных в диссертационной работе.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- Обоснована актуальность решения проблемы разрешения случайного числа многоэлементных сигналов в современных системах мобильных телекоммуникаций.
- Синтезирован оптимальный алгоритм и структура устройства полного разрешения флуктуирующих многоэлементных сигналов в комплексе хаотических негауссовых помех в общем виде на основе марково-**смешанных** полигауссовых вероятностных моделей и методом имитационного моделирования подтверждена его помехоустойчивость.
- Синтезирован адаптивный алгоритм полного разрешения флуктуирующих многоэлементных сигналов в комплексе хаотических негауссовых помех при априорной неопределенности относительно параметров распределения хаотической импульсной помехи и методом имитационного моделирования показана сходимость оценок весовых коэффициентов компонент распределения.
- Проведена конкретизация обобщенного **алгоритма** полного разрешения на основе **квазидетерминированной** модели многоэлементного радиоимпульсного сигнала, которая характерна для теории и практики современных систем мобильных телекоммуникаций.
- Обоснована и рассмотрена возможность реализации экономичных алгоритмов разрешения, основанных: а) на использовании для аппроксимации полигауссовых плотностей вероятности гауссовских компонент с одинаковыми ковариационными матрицами и различными векторами средних значений; б) на **ограничении** числа проверяемых сложных статистических гипотез. Разработана структурная схема устройства, реализующего один из вариантов упрощенного алгоритма разрешения.
- Разработан программный комплекс, позволяющий проводить статистическое моделирование широкого класса полигауссовых и **марково-смешанных** полигауссовых алгоритмов обработки многоэлементных сигналов (причем обеспечена возможность добавления новых синтезируемых алгоритмов, за **счет** модульного принципа построения на основе динамически подключаемых библиотек).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1. *Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф., Рахимов Р.Х., Мальцев Е.Ф., Шафигуллин М.И.* Структурно-стохастический подход к задаче распознавания сложных синапов в системах идентификации **объектов**// Вестник КГТУ им А.Н.Туполева, 1998. №2. С.7-12.
2. *Егоров А.Е., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф., Мальцев Е.Ф.* Технология моделирования систем и сетей связи на базе сетей **Петри**// КГТУ, каф. РТС, лабораторный практикум спец. 201000, 1999, 20 с.
3. *Егоров А.Е., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф., Валеев А.К.* Расчет ожидаемой дальности и анализ трафика в системах связи с подвижными объектами: Учебное **пособие**.//Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001, 88 с.
4. *Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф.* Анализ и моделирование помехоустойчивых алгоритмов обработки дискретных сигналов в системах подвижной **радиосвязи**// "Актуальные проблемы авиастроения" IX Всероссийские Туполевские чтения студентов, Тез. докл., Казань, 2000, 2 с.
5. *Егоров А.Е., Закиров Р.Х., Байгильдина Л.Ш., Осипова Е.А., Мальцев Е.Ф., Басков В.Н.* Внедрение **информационных** технологий на нефтедобывающих **предприятиях**// "Нефтяное хозяйство", №11, 2000, С.51-55.
6. *Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф.* Модели и эффективные алгоритмы обработки сигналов на основе вероятностных смесей с марковостью в информационных **системах**// Труды VII международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь" Воронеж, 2001, Т. 1, С.136-142.
7. *Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф.* Модели и методы обработки сигналов на основе вероятностных смесей с марковостью в информационных **системах**// Труды Международной конференции по телекоммуникациям IEEE/ICC2001, С.-Петербург, 2001, С.213-217.
8. *Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф.* Синтез поликорреляционных алгоритмов обработки **шумоподобных** сигналов систем CDMA//Труды 4-й Международной конференции и выставки "Цифровая обработка сигналов и ее применение" DSPA-2002, Москва, 2002, С.237-241.
9. *Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф.* Синтез помехоустойчивых алгоритмов разрешения негауссовских сигналов систем вторичной **радиолокации**//Труды Международной конференции-выставки

военных и двойных технологий "Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления", Нижний Новгород, 2002, 4 с.

Ю.Егоров А.Е., Закиров Р.Х., Байгильдина Л.Ш., Мальцев Е.Ф. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2002611538 "Информационная система для создания и эксплуатации геолого-технологических моделей залежей нефти "Гранат""//Российское агентство по патентам и товарным знакам (Роспатент), зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ, г. Москва, 2002.

11.Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф. Значение вероятностно-множественного подхода в преподавании инженерных дисциплин на современном этапе развития материальных и информационных технологий// IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies, Kazan, Russia, 9-12 September 2002, 5 p.

12.Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф. Марково-смешанные полигауссовы модели и технологии обработки сигналов в системах вторичной радиолокации//Труды I Международного радиоэлектронного форума (МРФ-2002), Украина, Харьков, 2002, 6 с.

13.Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Сафонов В.Л., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф., Кокунин П.А. Новые классы полигауссовых моделей в статистической теории приема сигналов современных радиоэлектронных систем//«Прикладная радиоэлектроника», 2003, В печати.

14.Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф. Устройство разрешения сигналов на фоне произвольной помехи// Положительное решение по заявке на полезную модель № 2003103526/20(004106) от 10.02.2003.

15.Егоров А.Е., Кокунин П.А. Алгоритм разрешения флуктуирующих многоэлементных сигналов при априорной неопределенности относительно значений вероятностей компонент импульсной помехи//Тезисы докладов VII Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Украина, Харьков, 2003, 2 с.

16.Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф., Закиров З.Г. Синтез обобщенного оптимального МС-ПГ алгоритма разрешения флуктуирующих многоэлементных сигналов на фоне помех// Телекоммуникации. 2003. № 7. В печати.

17.Егоров А.Е., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Надеев А.Ф., Закиров З.Г. Оценка параметров марково-смешанной полигауссовой модели в условиях априорной неопределенности и статистическое моделирование синтезированных алгоритмов// Телекоммуникации. 2003. № 7. В печати.